

レーザ計測を用いた大型鋼板の工程の支援(第2報) —精度評価と非矩形形状への適用—

電気通信大学 ○小林中, 千田 暁慧, 増田 宏

Large steel plates are often used for ships and storage tanks. They are manufactured from flat plates, but their shapes have been manually evaluated using template forms. Laser scanners are useful to evaluate plate shapes quantitatively and to maintain a sequence of bending processes. In this research, we explain a modeling process of curved plates based on point-clouds, and discuss a method for identifying reference lines on the plates. We evaluate computation time and preciseness using an actual curved plate. We also discuss point-based modeling of non-rectangular plates.

Keyword: point cloud, surface fitting, steel plate bending

1. はじめに

船舶や貯蔵タンクなどの大型建造物に使用されている曲げ板の加工には熟練した技術と経験が要求される。曲げ板は数m四方の平面板から人の手や機械によって徐々に曲げて作られており、曲面板が目標の形状になったかどうかは木型などを用いて作業員が判断する。木型と曲げ板の形状の比較から3次元のズレを目視で認識し、次に曲げる箇所を決める作業は、経験や勘に依存しているため、加工プロセスの妥当性評価や精度改善のための検討が困難になっている。さらに、作業者の教育にも長い時間と経験を要するため、加工技術の伝承も大きな問題となっている。

そこで本研究では曲面板の加工プロセスを3次元計測による点群データ処理によって可視化することを目的とする。近年では、広域の範囲を短時間かつ高精度で計測できるレーザスキャナが市販されており、大型の建造物を構成する鋼板の計測が容易となった。このようなスキャナで得られた点群を用いて板曲げのプロセスをモニタリングできれば、加工支援が可能であると考えられる。

前報では計測データから曲げ板の点群を抽出し、平面上に展開することで、基準位置を同定する手法を提案した。本報では、高速かつ安定に基準位置を算出する手順について示し、基準ラインについての精度評価を行う。また、切り欠き等を含む非矩形にも適用可能な手法を検討する。

2. 点群からの曲げ板生成とパラメータ化

板曲げの加工支援では、平面板が徐々に変形していく過程で、基準線を追跡していくことが重要である。ただし、現実の板曲げでは、実際に線を描くわけではなく、木型を当てる箇所に小さな印をつけている。本手法では、密な点群から境界線とコーナ点を算出し、それらを制約条件とした平面化を行うことで、板上の各点で2次元のパラメータ(u, v)を算出する。基準位置の同定は、(u, v)座標を用いて行う。まず、そのための手順について示す。

2.1 曲げ板のメッシュ生成

固定式レーザスキャナでは、レーザ光の方位角と仰角に関して、点群が等間隔に並んでいる。従って、スキャナ位置を原点とする点群を距離画像に変換できる[1]。メッシュの連結成分のうち、床と壁を除く最大連結成分を抽出することで、板のメッシュモデルを抽出する。(図1(a,b))。

ただし、点群計測においては、板厚の部分も点群として計測されている。そこで、メッシュの境界付近において、板と垂直に近い平面を領域成長法で検出し、除去する(図1(c))。

2.2 矩形形状モデルの作成

次に、板の境界ループから、図2(c)のような4個のエッジとコーナ点を検出する。境界ループは、ダイクストラ法を用いて、メッシュ境界を一周する最短経路として検出する(図2(b))。コーナ

点の算出においては、境界ループ上において、 k 個離れた2点を選択し、そのなす角度が θ となる点をコーナ点候補とする(図3(a, b))。ここでは、 $k=256$ 、 $\theta=150^\circ$ とした。コーナ点候補は、図3(b)のように、連続した点列として得られる。



図1. 曲げ板のメッシュ生成

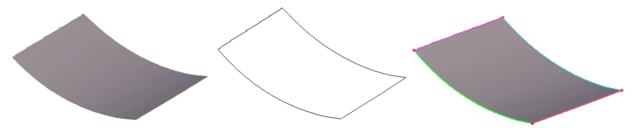


図2. 曲げ板のメッシュ生成

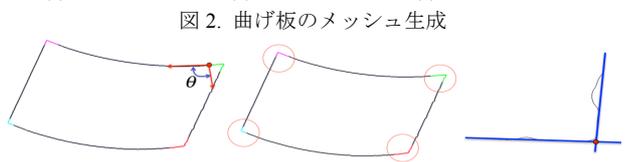


図3. コーナ点の算出



図4. 境界点と内部点

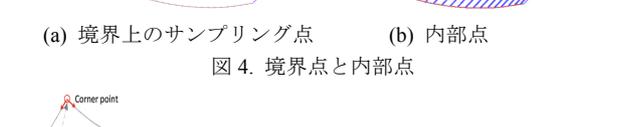


図5. 平面化



図6. パラメータ化と等パラメータ曲線

次に、コーナ点候補を平面上に投影した後、RANSAC法を用いて直線を検出する。2直線が検出されれば、それらの交点をコーナ点とする(図3(c))。計算されたコーナ点に最も近い点で、ループを4つに分割し、境界エッジとする。

2.3 平面化とパラメータ化

図4に示すように、境界エッジをBスプライン曲線に近似し、曲線上の点を等パラメータでサンプリングする。また、境界ループ内部の点をサンプリングして点を間引く。境界エッジの精度を保つには密な点群が必要であるが、大型鋼板の板曲げでは微小な凹凸は問題にならないため、内部点は大幅に間引くことができる。この例題では、板上の点を約30万点から1万点に間引いている。

次に、図5に示すように、コーナ点と境界エッジを制約条件が元の平板の境界と一致するように、点群を2次元平面上に写像する。ここでは、平面化の手法として、角度を保存するABF++(Angle Based Flattening)と調和写像に基づくHM(Harmonic Mapping)の2通りの手法を実装した。

平面化によって、各点は平面座標(u, v)と対応付けられるので、間引いた点群をBスプライン曲面で近似する。基準線はパラメータ空間に基づいて生成する。図6は、中心線を生成した例である。

3. 手法の評価

本手法を実装して、計算時間と精度の評価を行った。

3.1 計算時間の評価

点群を読み込んだ後、板を抽出し、Bスプライン曲面を生成するまでの計算時間を評価した。実験は、Intel Core i7 3.07GHz, 12GB RAMを搭載したPCで行った。曲げ板の点数は27万7721点、平面化の際の間引は1万点とした。実験の結果、CPU Timeは、ABF++を用いた場合で2.4 sec, HMを用いた場合で、1.6 secであった。ただし、ファイルの読み込み時間は含まれていない。どちらの場合も、十分実用的な時間で算出できた。

3.2 ABF++ と HM の比較実験

次に、ABF++とHMについて比較した。制御点の個数が同じ場合、パラメータ化が滑らかであるほど、Bスプライン曲面の残差が小さくなると考えられる。ここでは、平面化を行う点の個数を変えて、平面化に要する計算時間と曲面フィッティングの平均残差を計算した。結果を表1に示す。

計算時間においては、HMが点の個数にほぼ比例して計算時間が増大するのに対して、ABF++では、計算時間が加速度的に増大した。また、いずれのケースでもHMが圧倒的に高速であった。これは、ABF++が非線形最適化、HMは線形計算であるためと考えられる。平均残差についても、HMが優れており、点の個数によらず、ほぼ一定の値であった。ABF++では、点の個数が多いほど、残差が少なくなった。ただし、板曲げで要求される精度は厳しくないため、ABF++でも10,000点程度を用いれば問題ないと考えられる。

表1. B-spline 曲面の残差

| | 点の個数 | 1,000 | 5,000 | 10,000 | 50,000 |
|-------|------|-----------|----------|----------|----------|
| ABF++ | 平均残差 | 1.71 mm | 1.12 mm | 0.94 mm | 0.70 mm |
| | 計算時間 | 0.04 sec | 0.28 sec | 0.71 sec | 5.89 sec |
| HM | 平均残差 | 0.40 mm | 0.45 mm | 0.45 mm | 0.45 mm |
| | 計算時間 | 0.006 sec | 0.02 sec | 0.05 sec | 0.26 sec |

表2. 格子の等長性と等角度性に関するずれの標準偏差

| | d_u の偏差 | d_v の偏差 | 角度の偏差 |
|-------|-----------|-----------|----------|
| ABF++ | 1.26 mm | 0.99 mm | 0.14 deg |
| HM | 0.78 mm | 0.35 mm | 0.15 deg |

3.3 基準線の精度評価

次に、基準線の精度に関する評価を行った。今回の板曲げで扱った鋼板上に等間隔で引かれた仮想的な基準線を考え、板曲げ後

に等間隔性が保持されるかどうかを検証した。また、等パラメータ線は 90° で直交しているの、直角性についても検証した。ここでは、図7のように、Bスプライン曲面をu, v方向に10等分し、エッジ長さが等しくなるかどうかを求めた。この板は、約4m四方であるため、一辺の長さは約40cmである。また、角度については、 90° からのずれを調べた。すべてのエッジに関して長さ d_u と角度 θ を求め、それらの標準偏差を算出したものを表2に示す。

HMの方がよい結果となったが、ABF++も実用上は十分な精度であり、今回の例題においては、どちらの手法も利用可能であることがわかった。

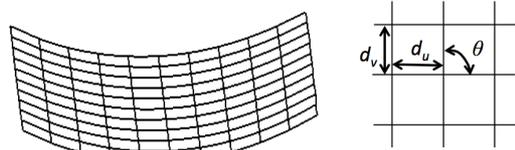


図7. 等長性と等角性の評価

4. 非矩形形状

加工に用いる板は矩形形状とは限らないため、非矩形形状への対応について検討する。ここでは、元の平板の形状は既知であるとする。

境界検出においては、コーナ点のRが大きくなければ、矩形形状と同じ手法が適用できる。図8は、矩形形状の検出と同様の手法で境界におけるコーナ点を検出し、それに基づいて境界の分割を行ったものである。板形状は既知であるため、検出された境界上の点を平板の境界に合わせることで、内部点のパラメータ化を行うことができる。ただし、平面化においては、HMは凸形状のみに対応しているため、ここではABF++を用いる。

平面化した後は、Bスプライン曲面を算出し、板全体のパラメータ化を行う。ただし、点群が矩形でないため、曲面の計算はWeissらの手法[4]を用いる。この方法は、トリム曲面を考慮して、以下の最適化によって曲面を算出することを考える。

$$\sum_i |P_i - S(u_i, v_i)|^2 + \lambda \iint (S_{uu}^2 + S_{uv}^2 + S_{vv}^2) \rightarrow \min$$

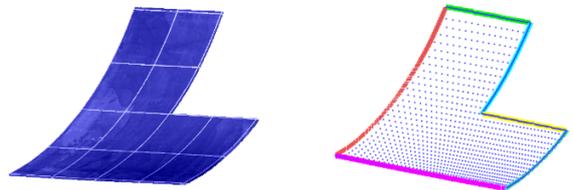


図4. 非矩形形状からのコーナ点と境界エッジ検出

5. おわりに

本報では、大型鋼板の加工支援のために、計測データからモデルを作成し基準ラインを同定する手法を示し、計算時間と精度の評価を行った。また、非矩形形状への拡張方法についても示した。その結果、大規模点群からでも十分実用的な計算速度と精度が得られることがわかった。

ただし、今回は、評価した点群の個数が少なく、また2方向に大きな曲率を持つ板での評価は行えなかった。今後はより多くの板について評価を行う必要がある。また、非矩形形状については、基準線の精度が低下する可能性があるが、その評価についても今後の課題である。また、現場での活用を考慮したインタフェースや形状特徴量についても考える必要が有る。

参考文献

- [1] H. Masuda, I. Tanaka: Extraction of Surface Primitives from Noisy Large-Scale Point-Clouds, Computer-Aided Design & Applications, 6(3), 2009, 47-57.
- [2] A. Sheffer: ABF++ Fast and Robust Angle Based Flattening, ACM Transaction of Graphics, 24(2), 2005, 311-330.
- [3] M. Eck, et al. Multiresolution analysis of arbitrary meshes. SIGGRAPH'95, 1995, 173-182.
- [4] V. Weiss, et al. : Advanced surface fitting techniques, Computer Aided Geometric Design 19, 2002, 19-42.